Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий

Н. В. Крутских¹, И. Ю. Кравченко²

¹ *Институт геологии Карельского научного центра РАН
Петрозаводск, 185910, Россия
E-mail: natkrut@gmail.com*

² *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
Петрозаводск, 185910, Россия*

В работе рассмотрен метод использования данных дистанционного зондирования при геоэкологическом мониторинге урбанизированных территорий. Снежный покров в пределах городских территорий подвергается значительному загрязнению, при этом изменяются его отражающие способности. Оценка трансформации снежного покрова города проводится по данным программы Landsat. В качестве критериев оценки используются индексы, основанные на изменении отражательной способности чистого и загрязнённого снега в различных диапазонах. Выявлены тесные корреляционные связи между применяемыми индексами и содержанием технофильных элементов в снеге. Установлено, что спектральные индексы фиксируют различия минерального и химического составов загрязняющих примесей. Это позволяет выявлять вклад различных источников в загрязнение снежного покрова в городе. На примере г. Петрозаводска разработаны основные алгоритмы мониторинга качества снега по данным дистанционного зондирования в пределах городских территорий. Снежный покров наблюдается на полигонах, привязанных к открытым территориям, где в зимний период он не подвергается смещению, уборке. Проверка заснеженности площадок мониторинга по данным космоснимков проводится по двум группам критериев. Наиболее оптимальным временем для мониторинга загрязнения снежного покрова является период начала снеготаяния.

Ключевые слова: Landsat, дистанционное зондирование Земли, снеговой покров, снежные индексы, NDSI, мониторинг, урбанизированные территории

Одобрена к печати: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168

Введение

Снеговой покров является надёжным индикатором состояния приземной атмосферы. Загрязнение снега в городе происходит за счёт выбросов промышленных и коммунальных предприятий, сгорания топлива, антигололёдных средств, представленных как абразивными материалами, так и химическими реагентами (Салтан и др., 2015). Наиболее распространёнными элементами, содержащимися в избытке в атмосфере крупного города, являются железо, хлор, алюминий, цинк, марганец, натрий, бром, ванадий, хром, сурьма, ртуть и др. (Прокачева, Усачев, 1989). Конкретное количество и состав загрязняющих веществ зависит от размера города и преобладающей промышленности. Размеры частиц, составляющих городскую пыль, изменяются от крупных (диаметром около 20 мкм), до тонких (диаметром менее 0,001 мкм). Тонкая и полутонкая фракция не осаждаются при сухой атмосфере, возможно её распространение на региональном и глобальном уровнях. Крупные частицы сосредоточены в нижнем слое тропосферы, переносятся ветром на некоторые расстояния и осаждаются за счёт силы тяжести. Пути загрязнения снежного покрова, кроме ветрового переноса и осадения из воздуха твёрдых пылевых частиц, а также вымывания осадками аэрозольных загрязняющих веществ, могут быть газовый обмен между снежным покровом и воздухом в приземном слое и механическое или химическое загрязнение путём посыпания песком или солью. Таким образом, снежный покров накапливает спектр загрязняющих веществ, которые после снеготаяния попадают в почвы, грунты, поверхностные и подземные воды из атмосферы. Вокруг городских агломераций формируются зоны различной степени загрязнённости.

Исследованию снежного покрова и перспективности дистанционного изучения его спектральных свойств в качестве индикатора интенсивности аэротехногенной нагрузки уделено достаточное внимание. Экспериментальные работы, подтверждающие зависимость спектральной отражающей способности снега от количественного и качественного состава пыли, проводились Государственным гидрологическим институтом ещё в 80-х гг. прошлого столетия (Прокачева, Усачев, 1989). С помощью полевых радиометрических исследований выявлены различия в спектральной отражательной способности для снега на площадках, находящихся на различном удалении от трассы и характеризующихся разным количеством твёрдых частиц (Чепелев и др., 2010). Разработан метод выделения зон аэротехногенного загрязнения вокруг промышленных объектов в тундровой зоне методом интерполяции, основанном на линейной регрессии. При этом использовалось сопоставление результатов химического анализа образцов снежного покрова и яркостных характеристик поверхности в различных каналах (Василевич и др., 2015). Множество исследований отмечают наличие прямой взаимосвязи между содержанием пылевых веществ в снегу и динамикой снеготаяния (Дмитриев, Дмитриев, 2008; Прокачева, Усачев, 1989). Для оценки уровня загрязнения снега наиболее распространёнными критериями являются его отражательные характеристики в различных каналах (Дмитриев, Дмитриев, 2008; Лагутин и др., 2011; Ярославцева, Рапуга, 2016) и снежные индексы (Потапов и др., 2014; Сухинин и др., 2011).

Большинство работ, рассматривающих дистанционные методы оценки снежного покрова как индикатора уровня аэротехногенного загрязнения, основывается на использовании спутниковых радиометров MODIS, которые характеризуются низким пространственным разрешением (250–1000 м). Это не позволяет получать достаточно детальную информацию для мониторинга снежного покрова в городах. В данном случае наиболее подходящей является миссия Landsat. Пространственное разрешение здесь составляет 30 м и 15 м — для панхроматического канала.

Таким образом, имеются предпосылки для применения данных ДЗЗ с целью мониторинга уровня трансформации снежного покрова урбанизированных территорий. В связи с этим необходимо определить основные принципы и подходы использования данных дистанционного зондирования в геоэкологическом мониторинге урбанизированных территорий.

Методика исследования

В качестве исходного материала данных ДЗЗ используются безоблачные снимки Landsat от 17 февраля 2015 г. и 20 февраля 2011 г., сделанные в снежный период при отсутствии обильных снегопадов за 5–7 дней до съёмки. Территория исследования относится к Петрозаводскому городскому округу. Геометрическая коррекция снимка выполнена по опорным точкам в программном комплексе ENVI. Все необходимые каналы выбранного снимка подверглись радиометрической калибровке и переводу значений яркостей DN в значения отражательной способности подстилающей поверхности. Для уменьшения влияния атмосферы и дальнейшего сопоставления разновременных данных применена атмосферная коррекция методом DOS — Dark Object Subtraction, основанная на вычитании тёмного объекта (Chavez, 1988).

При создании маски снежного покрова учитываются две группы критериев. Во-первых, в качестве показателя снежного покрова рассчитывается нормализованный индекс снега *NDSI*. Снежные поверхности имеют *NDSI* > 0,4 (Сухинин и др., 2011). Для снимков MODIS данный индекс рассчитывается как отношение яркости в 4-м и 6-м каналах (Лагутин и др., 2011; Сухинин и др., 2011). Длина волны в 4-м канале составляет 0,544–0,565 нм и 1,628–1,652 нм — в 6-м канале, что соответствует зелёному (*Green* 0,525–0,6 нм) и среднему инфракрасному (*Swir1* 1,55–1,66 нм) каналам сканера Landsat. Таким образом, для снимков Landsat формула расчёта *NDSI* приобретает вид:

$$NDSI = \frac{Green - Swir1}{Green + Swir1},$$

где *Green* и *Swir1* — коэффициент отражения в зелёной и средней инфракрасной зонах.

Чтобы исключить объекты, не являющиеся снегом, но имеющие $NDSI > 0,4$ (например, воду), учитываются коэффициенты отражения в ближнем инфракрасном канале $> 0,11$ и зелёном канале $> 0,1$ (Hall et al., 2002).

Во-вторых, для территорий, покрытых растительностью, определяется вегетационный индекс $NDVI$. Площади с индексом $NDVI > 0,1$ относятся к залесенным и не рассматриваются.

Индекс $NDSI$ используется и как критерий оценки качества снежного покрова, так как метеорологические условия по данным архива погоды к моменту получения снимка позволяют говорить о возможности снеготаяния, интенсивность которого находится в прямой зависимости от количества пылевых частиц (Дмитриев, Дмитриев, 2008; Прокачева, Усачев, 1989). В связи с необходимостью получения критериев, отражающих загрязнение снега, в работе используется обратно пропорциональные значения $NDSI$ без нормирования — $Swir1/Green$.

Анализ кривых по снимку Landsat-8 для различных заснеженных поверхностей в пределах г. Петрозаводска показал, что отражающая способность снега в видимом диапазоне снижена (рис. 1). В отличие от чистого снега в зелёном канале наблюдается значимое снижение отражения, что связано с наличием инородных примесей различного характера — пыли, сажи, хвои. Уровень отражения в пределах ближнего инфракрасного диапазона увеличивается с расстоянием от города, максимальные пики отражения приходятся на фоновые территории вдали от техногенного воздействия. Ранее установлено, что присутствие оксидов железа уменьшает отражательные свойства в видимой части спектра и увеличивает в ближней инфракрасной зоне (Брюханов и др., 1982). Таким образом, отношение ближнего инфракрасного и зелёного каналов также позволяет оценить загрязнение снега.

Рис. 1. Отражательная способность различных поверхностей. Сплошной линией показаны поверхности по литературным данным; пунктирными линиями — данные снимка Landsat-8 от 17 февраля 2015 г.

Для комплексного учёта всех факторов, оказывающих влияние на состояние снежного покрова, и оценки уровня загрязнения снега просуммируем индексы, используемые как критерии качества снега:

$$\text{ИЗС} = \frac{\text{Swir1}}{\text{Green}} + \frac{\text{Nir}}{\text{Green}} = \frac{\text{Swir1} + \text{Nir}}{\text{Green}},$$

где ИЗС — индекс загрязнённости снежного покрова; *Swir1*, *Nir*, *Green* — коэффициенты отражения в среднем инфракрасном, ближнем инфракрасном и зелёном каналах.

Зависимость химического состава снега и снежных индексов
($r_{xy} = |0,67|$, при $\alpha = 0,05$, $n = 9$)

	<i>Nir/Green</i>	<i>Swir1/Green</i>	ИЗС		<i>Nir/Green</i>	<i>Swir1/Green</i>	ИЗС
K+	0,55	0,33	0,54	V	0,74	0,32	0,69
Na+	−0,19	−0,10	−0,18	Cr	0,52	0,41	0,53
Ca ₂ ⁺	0,60	0,20	0,55	Mn	0,29	0,23	0,29
Mg ₂ ⁺	0,27	0,21	0,27	Fe	0,66	0,49	0,66
SO ₄ ^{2−}	0,13	0,41	0,20	Co	0,28	0,42	0,33
Cl [−]	0,02	−0,07	0,00	Ni	0,78	0,36	0,73
P _{общ}	0,22	0,14	0,21	Cu	0,72	0,22	0,65
NH ₄ ⁺	−0,21	−0,04	−0,18	Zn	−0,09	−0,10	−0,10
NO ₂ [−]	−0,20	−0,14	−0,20	As	0,24	0,28	0,26
NO ₃ [−]	0,40	−0,05	0,33	Se	−0,05	−0,06	−0,06
нефтепродукты	−0,10	0,21	−0,04	Mo	0,27	0,10	0,25
щёлочность	0,66	0,25	0,60	Cd	0,76	0,35	0,72
pH	0,33	−0,18	0,24	Sn	0,05	0,44	0,14
Li	0,74	0,42	0,71	Cs	0,27	0,19	0,27
Be	−0,32	0,10	−0,25	Ba	0,20	0,15	0,20
B	−0,35	−0,21	−0,34	W	0,26	0,40	0,30
Mg	0,77	0,46	0,74	Pb	−0,50	−0,30	−0,49
Al	0,75	0,61	0,76	ЛРЗЭ	0,29	0,38	0,33
Ca	0,65	0,34	0,62	ТРЗЭ	0,47	0,45	0,49
Ti	0,40	0,47	0,44				

В феврале 2015 г. в рамках работ по оценке состояния компонентов природной среды и разработки комплексного геоэкологического мониторинга были отобраны пробы снега и проведён химический анализ талой фазы в девяти районах города. Снег отбирался методом конверта, проба представляет собой одну объединённую. Затем снег растапливался при комнатной температуре и анализировался. Аналитическая работа проводилась в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, также был сделан прецизионный химический анализ методом ISP-MS в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН. Практически одновременное получение данных позволяет провести сравнительную характеристику отражения, спектральных индексов и химического состава снежного покрова. Привязка точек опробования осуществлялась при помощи GPS-навигации в координатной системе WGS 84. Отражение в одной пробе свойств снега для участка радиусом 10 м позволяет сопоставить их с пикселями космического изображения. Для получения показателей дистанционных критериев оценки в зонах отбора проб методами зональной статистики программного обеспечения ArcGis вычислены их средние значения.

Исследования химического состава снежного покрова показали, что содержание практически всех компонентов выше значений, полученных ранее на фоновых территориях за

пределами влияния города (Лозовик, Потапова, 2006). Повышенное содержание в талой снеговой воде ионов Na^+ и Cl^- связано с использованием песчано-солевой смеси для посыпки дорог. Сульфаты в исследованных пробах снега находятся в солевой форме. Источниками калия, кальция, сульфатов, гидрокарбонатов в снеге являются пылевидные частицы цемента и известняка. Среднее значение рН (6,25) выше равновесного, принятого для атмосферных осадков (5,6), что связано с нейтрализацией осадков пылевидными выбросами, содержащими карбонатные и силикатные частицы. Наблюдается повышенное содержание общего железа в атмосферных осадках в районе ТЭЦ, стадиона «Динамо» и у автовокзала. Средние концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и Al незначительно превышают фоновые значения (Крутских и др., 2016).

Индекс снега NDSI , полученный для точек опробования, варьирует от 0,51 до 0,67, что соответствует значениям для снежного покрова. Уровень рассчитанного индекса загрязнения ИЗС изменяется в пределах 1,48–2,1, коэффициент вариации составляет 11,4%. Сопоставление данных химического состава и снежных индексов выявило некоторые зависимости разной тесноты связей (таблица, см. с. 162). Статистически значимая связь ($r_{xy} > 0,67$) установлена между ИЗС и содержанием Li , Mg , Al , V , Ni , Cd в талой воде. Средняя связь обнаруживается для K , Ca , общей щёлочности, Cr , Fe , Cu . Умеренная связь проявлена для Ti . Повышенное содержание данных элементов отражает техногенное поступление загрязняющих веществ в приземные слои атмосферы и снег. Необходимо отметить, что умеренная отрицательная зависимость зафиксирована для Pb . Это связывается с тем, что техногенные источники свинца в настоящее время не приурочены к стационарным и мобильным объектам сжигания топлива в связи с переходом котельных на жидкое топливо и использование неэтилированного бензина в автотранспорте.

Мониторинг снежного покрова

Значимые корреляционные связи снежных индексов и содержание химических элементов в снеге позволяют разработать методику оценки снежного покрова для геоэкологического мониторинга по данным дистанционного зондирования Земли. Для этого в г. Петрозаводске на открытых участках с обильным снегонакоплением выбрано 34 тестовых полигона диаметром 30 м. Одним из требований к площадке является сохранение её естественного состояния в течение всего зимнего периода. Наиболее подходящими являются территории в пределах акваторий, где отсутствует уборка снежного покрова. На Онежском озере в пределах Петрозаводской губы для оценки влияния города заложены два профиля на расстоянии 3–4 км с шагом между площадками около 1 км. В черте городской застройки ледяные подстилающие поверхности наблюдаются в пределах затопленного карьера «Каменный Бор», оз. Четырехверстное, оз. Ламба, за городом — оз. Лососиное. Также выделены территории с соответствующими условиями на снежных поверхностях в различных районах города и на фоновых площадях, расположенных в 10 км к западу и в 50 км к северо-востоку от города. Для отнесения выбранных площадей к заснеженным и исключения воздействия древесной растительности все участки проверены на соответствие критериям: индекс $\text{NDSI} > 0,4$; коэффициенты отражения в канале $\text{Nir} > 0,11$ и канале $\text{Green} > 0,1$; индекс $\text{NDVI} < 0,1$.

По снимку Landsat-8 от 17.02.2015 для данных площадок рассчитаны средние значения индексов NDSI , ИЗС. Выявлено, что NDSI изменяется от 0,54 до 0,73 при среднем значении 0,65. ИЗС варьирует от 1,31 до 1,84 при среднем 1,56. Наибольшие значения ИЗС принадлежат площадкам в центральной части города, заложенным рядом с промышленными предприятиями и вблизи дорог. Повышенные значения индекса загрязнения наблюдаются в северной части города, где расположены промышленные площадки, ТЭЦ. Следует отметить, что высокие значения индекса характерны для площадок, находящихся в 10 км северо-восточнее городской застройки. Это связано с работой ТЭЦ и преобладанием ветров, дующих с юго-запада. Участок, расположенный в 10 км западнее ТЭЦ, так же как и другие загородные территории, показывает низкие значения ИЗС. В пределах городской застройки низкие значения ИЗС отмечены в рекреационных зонах города.

Рис. 2. Распределение ИЗС и NDSI на площадках мониторинга по данным снимков Landsat-5 от 20.02.2011 и Landsat-8 от 15.02.2015

Рис. 3. Наблюдение загрязнения снежного покрова на площадках мониторинга по данным Landsat-5 от 20.02.2011 и Landsat-8 от 15.02.2015: 1 — маска снежного покрова; 2 — распределение ИЗС; 3 — площадка мониторинга, цветом показаны диапазоны ИЗС

Анализ загрязнения снежного покрова в пределах Петрозаводской губы Онежского озера выявил небольшое уменьшение значений индекса с удалением от города (рис. 2, см. с. 164), что обусловлено осаждением крупных пылевых частиц вблизи берега и переносом мелкой фракции на дальние расстояния.

Для сравнения данных по снимку Landsat-5 от 20.02.2011 по той же методике вычислены значения *NDSI*, *ИЗС*. Отмечено, что заснеженность территории в 2011 г. была значительно выше, о чём свидетельствует и индекс *NDSI*. Это связано с обильными снегопадами и низкими температурами в феврале 2011 г. (архив погоды в Петрозаводске, <https://rp5.ru/>). Индекс *NDSI* изменяется в пределах 0,51–0,75 при среднем 0,66. Уровень загрязнённости в 2011 г. снижен по сравнению с 2015 г. Значения *ИЗС* варьируют от 1,17 до 1,41. Разница *ИЗС* между 2015 и 2011 гг. в среднем составляет 0,2. Однако в целом картина загрязнения в сравнении с фоновыми площадями схожа с 2015 г. (рис. 3, см. с. 164). Также наиболее загрязнёнными являются точки, расположенные в северной части города в зоне воздействия ТЭЦ. С удалением от города заметно снижение уровня загрязнения.

Обсуждение результатов

Наиболее контрастные данные получены для периода, приходящегося на начало таяния снега. Это связано с тем, что при снеготаянии происходит быстрое снижение отражающей способности подстилающей поверхности, а интенсивность таяния зависит от уровня загрязнения снежного покрова. Это также подтверждается в работе (Дмитриев, Дмитриев, 2008), где авторы показывают, как альbedo поверхности снижается пропорционально количеству примесей, находящихся в снеге. В связи с этим для мониторинга необходимо использовать снимки, полученные в начальной стадии таяния снега, когда накопление загрязняющего материала достигает высоких значений и происходит наиболее заметное изменение спектральных характеристик снежного покрова.

Содержание элементов в снежном покрове неоднозначно фиксируется дистанционными индексами. Так, отношение *Nir/Green* реагирует на изменение содержания в талой воде ассоциации элементов, включающей Cd, Ni, V, Cu, Li, Mg, Fe, Al. Индекс *Swirl/Green* в равной степени реагирует как на предыдущую группу, так и на ассоциацию W, Ti, Co, Sn. Оба индекса реагируют слабо на изменения группы Ba, Mn, Mo, Cr, Mg. Данные ассоциации элементов в снеге сформированы за счёт поступления их в снежный покров из разных источников. Эти источники могут воздействовать как по отдельности, так и накладываться друг на друга. Основным крупным источником аэрогенного загрязнения является ТЭЦ. Индекс *Nir/Green* отчётливо фиксирует воздействие данного источника в северной части города и вытягивание шлейфа загрязнения по розе ветров в северо-восточном направлении. Использование песчано-солевых смесей также оказывает влияние на отражающие характеристики снежного покрова. В качестве противогололёдных средств в городе используются добавки различного минерального, а соответственно и химического, состава, в связи с этим отличается и реакция индексов. Максимальные значения индекса *Swirl/Green* выявлены в центральной части города, где в большей мере применяются противогололёдные средства. Таким образом, *Nir/Green* фиксирует преимущественно загрязнение от источников сгорания, а индекс *Swirl/Green* отражает комплекс факторов.

Необходимо отметить, что полученные результаты хорошо сопоставимы с ранее проводимыми исследованиями. Так, в работе (Василевич и др., 2015) для угледобывающих территорий также отмечается хорошая корреляция спектральных характеристик поверхности снежного покрова и pH, удельной электропроводности с суммарным содержанием всех макрокомпонентов, суммарным содержанием кальция и магния, содержанием гидрокарбонатов, а также валовыми содержаниями таких микрокомпонентов, как ванадий, алюминий, марганец, никель, медь, хром, свинец и сера.

Выводы

1. В комплексный геоэкологический мониторинг урбанизированных территорий можно включать мониторинг снежного покрова на основе данных дистанционного зондирования. В работе разработаны принципы подобного мониторинга на основе программы Landsat, подходящей для крупномасштабных исследований.
2. Наиболее оптимальным временем для мониторинга загрязнения снежного покрова является период начала снеготаяния, так как в это время более чётко выявляются различия спектральных характеристик чистого и грязного снега.
3. В качестве критериев оценки используются индексы, основанные на изменении отражательной способности чистого и загрязнённого снега в различных диапазонах. Определено, что спектральные индексы фиксируют различия минерального и, соответственно, химического составов загрязняющих примесей, что позволяет выявить различные типы источников загрязнения снежного покрова в городе.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0222-2018-0218).

Литература

1. Брюханов А. В., Господинов Г. В., Книжников Ю. Ф. Аэрокосмические методы в географических исследованиях. М.: МГУ, 1982. 232 с.
2. Василевич М. И., Щанов В. М., Василевич Р. С. Применение спутниковых методов исследований при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 50–60.
3. Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Корреляция динамики снеготаяния и содержания пылевых веществ в снегу вокруг г. Омска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. № 5. С. 84–91.
4. Крутских Н. В., Бородулина Г. С., Казнина Н. М., Батова Ю. В., Рязанцев П. А., Ахметова Г. В., Новиков С. Г., Кравченко И. Ю. Геоэкологические основы организации мониторинга северных урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2016. № 12. С. 52–67.
5. Лагутин А. А., Суторихин И. А., Сеницин В. В., Жуков А. П., Шмаков И. А. Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2011. № 24. С. 60–66.
6. Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территории Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 1. С. 111–118.
7. Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Быков А. А., Андреева Н. В. Применение данных дистанционного зондирования для оценки экологического состояния природных объектов в угледобывающем регионе в зимние периоды времени // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы международной научной конференции. Красноярск, 2014. С. 32–35.
8. Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 176 с.
9. Салтан Н. В., Шлапак Е. П., Жиров В. К., Гонтарь О. Б., Святковская Е. А. Химический состав снега на урбанизированных территориях в условиях Крайнего Севера // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18. № 2. С. 328–334.
10. Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 4. С. 90–96.
11. Чепелев О. А., Ломиворотова О. М., Украинский П. А., Терехин Э. А. Изучение связи запыленности снега с его спектральной отражательной способностью // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1. С. 1162–1166.
12. Ярославцева Т. В., Рапуста В. Ф. Использование космоснимков и наземных наблюдений для анализа полей длительного загрязнения снежного покрова города // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 4. № 1. С. 50–54.

13. Chavez P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multi-spectral data // *Remote Sensing of Environment*. 1988. V. 24. P. 459–479.
14. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., DiGirolamo N. E., Bayr K. J., Jin J. M. MODIS snow-cover products // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. No. 1. P. 181–194.

The use of Landsat satellite images for geoecological monitoring of urbanized areas

N. V. Krutskikh¹, I. Yu. Kravchenko²

¹ *Institute of Geology of Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk 185910, Russia*
E-mail: natkrut@gmail.com

² *Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre RAS*
Petrozavodsk 185910, Russia

A method for using remote probing data for the geoecological monitoring of urbanized areas is described. As snow cover in urban areas is considerably contaminated, its reflecting ability is changed. Assessment of snow cover transformation in a city is based on the data obtained by Landsat software. Indices based on variations in the reflecting ability of clean and dirty snow in various ranges are used as assessment criteria. It was found that the indices used and the concentration of technophilic elements in the snow correlate closely. Spectral indices show differences in the mineral and chemical compositions of contaminating impurities. Therefore, the contribution of various sources to snow cover contamination in a city can be estimated. The City of Petrozavodsk was used as an example for developing major algorithms for snow quality monitoring based on remote probing data for urban areas. Snow cover is formed at open-air dumping sites, from which snow is not removed in winter season. Two groups of criteria are used to check snow cover thickness at monitoring sites with the help of satellite images. The snow melting period is the optimum time for monitoring snow cover contamination.

Keywords: Landsat, remote sensing of the Earth, snow cover, snow indexes, NDSI, monitoring, urbanized areas

Accepted: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168

References

1. Bryukhanov A. V., Gospodinov G. V., Knizhnikov Yu. F., *Aerokosmicheskie metody v geograficheskikh issledovaniyakh* (Aerospace methods in geographical research), Moscow: MGU, 1982, 232 p.
2. Vasilevich M. I., Shchanov V. M., Vasilevich R. S., *Primenenie sputnikovykh metodov issledovani pri otsenke zagryazneniya snezhnogo pokrova vokrug promyshlennykh predpriyatii v tundrovoi zone* (Application of satellite methods to assess snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 50–60.
3. Dmitriev A. V., Dmitriev V. V., *Korrelyatsiya dinamiki snegotayaniya i sodержaniya pylevykh veshchestv v snegu vokrug g. Omska* (Correlation of the dynamics of snow melting and the content of dust substances in the snow around Omsk), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, No. 5, pp. 84–91.
4. Krutskikh N. V., Borodulina G. S., Kaznina N. M., Batova Yu. V., Ryazantsev P. A., Akhmetova G. V., Novikov S. G., Kravchenko I. Yu., *Geoekologicheskie osnovy organizatsii monitoringa severnykh urbanizirovannykh territorii (na primere g. Petrozavodsk)* (Geoecological Basis for the Organization of Monitoring of the Northern Urbanized Territories (by the Example of Petrozavodsk)), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, No. 12, pp. 52–67.

5. Lagutin A. A., Sutorikhin I. A., Sinitsin V. V., Zhukov A. P., Shmakov I. A., Monitoring krupnykh promyshlennykh tsentrov yuga Zapadnoi Sibiri s ispol'zovaniem dannykh MODIS i nazemnykh nablyudenii (Monitoring of large industrial centers of the South of West Siberia using the MODIS and field observation data), *Optika atmosfery i okeana*, 2011, No. 24, pp. 60–66.
6. Lozovik P. A., Potapova I. Yu., Postuplenie khimicheskikh veshchestv s atmosferynymi osadkami na territorii Karelii (The receipt of chemicals with atmospheric precipitation in the territory of Karelia), *Vodnye resursy*, 2006, Vol. 33, No. 1, pp. 111–118.
7. Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Bykov A. A., Andreeva N. V., Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya prirodnnykh ob"ektov v ugledobyvayushchem regione v zimnie periody vremeni (Application of remote sensing data to assess the ecological status of natural sites in the coal-mining region in winter periods), *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. Materialy konferentsii* (Proc. Conf. "Regional problems of remote sensing of the Earth"), Krasnoyarsk, 2014, pp. 32–35.
8. Prokacheva V. G., Usachev V. F., *Snezhnyi pokrov v sfere vliyaniya goroda* (Snow cover in the sphere of city influence), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 176 p.
9. Saltan N. V., Shlapak E. P., Zhiron V. K., Gontar' O. B., Svyatkovskaya E. A., Khimicheskii sostav snega na urbanizirovannykh territoriyakh v usloviyakh Krainego Severa (The chemical composition of the snow in urban environment in the Far North), *Vestnik MGTU*, 2015, Vol. 18, No. 2, pp. 328–334.
10. Sukhinin A. I., Vorob'eva M. V., Okhotkina E. A., Kosmicheskii monitoring snegovogo pokrova Sibiri po dannym radiometra MODIS (Remote sensing of snow cover in Siberia on data of radiometer MODIS), *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011, No. 4, pp. 90–96.
11. Chepelev O. A., Lomivorotova O. M., Ukrainskii P. A., Terekhin E. A., Izuchenie svyazi zapylenosti snega s ego spektral'noi otrazhatel'noi sposobnost'yu (Studying the influence of snow cleanliness level on its spectral reflecting power), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2010, Vol. 12, No. 1, pp. 1162–1166.
12. Yaroslavtseva T. V., Raputa V. F., Ispol'zovanie kosmosnimkov i nazemnykh nablyudenii dlya analiza polei dlitel'nogo zagryazneniya snezhnogo pokrova goroda (Using satellite imagery and ground surveillance for the analysis of long-term pollution fields of city snow cover), *INTEREXPO Geo-Siberia*, 2016, Vol. 4, No. 1, pp. 50–54.
13. Chavez P. S., An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 24, pp. 459–479.
14. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., DiGirolamo N. E., Bayr K. J., Jin J. M., MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, No. 1, pp. 181–194.